N° 3.

NOTE SUR LA PRÉVISION DES CRUES,

par M. CALLET,

Ingénieur des Ponts et Chaussées.

La méthode de prévision des crues établie par M. BACHET, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées (*Annales des Ponts et Chaussées,* 1934-III, page 409), s'est montrée extrêmement fructueuse et, en particulier, son application aux bassins de la Loire et de la Seine a donné d'excellents résultats.

Pour la prévision des crues du Rhin à Strasbourg, on ne dispose, en raison des variations considérables du lit, que d'un nombre très restreint d'observations utilisables pour la détermination empirique des correspondances entre les différentes échelles; d'autre part, les crues étant souvent très brusques et l'atténuation y jouant en conséquence un rôle essentiel (elle peut atteindre entre Neufbrisach et Strasbourg, sur une distance de 68 kilomètres, 10 p. 100 du débit de la crue), il est nécessaire de déterminer cette dernière aussi exactement que possible et de ne pas limiter cette détermination aux maxima et minima pour lesquels la méthode graphique de M. BACHET en donne une valeur approchée. Nous avons donc été amené à rechercher la possibilité de calculer l'atténuation du débit Δr, entre deux stations distantes de Δx, en partant de la formule établie par M. BACHET (page 420) : $\Delta r = \frac{\partial \rho}{\partial x} \Delta x$.

Dans un cours d'eau à forte pente, comme le Rhin entre Bâle et Strasbourg, le débit complémentaire ρ défini par M. BACHET reste très faible par rapport au débit normal r; la pente motrice en crue est, en effet, toujours très voisine de la pente en régime permanent, la pente propre de l'onde de crue $\frac{\partial h}{\partial x}$ étant très faible par rapport à la pente moyenne i

(entre Neufbrisach et Strasbourg, les variations de niveau ne dépassent pas 10 cm. par heure, la vitesse de propagation est de l'ordre de 3 km. à l'heure, $\frac{\partial h}{\partial x}$ est ainsi au maximum égal à $\frac{0{,}10}{3000}$ soit moins de 5 p. 100 de la pente moyenne), de telle sorte que les correspondances, aux différentes stations, entre les débits et les niveaux peuvent être considérées comme univoques.

Dans le calcul de ρ effectué par M. Bachet (page 416), mettons en évidence la variation du profil d'écoulement du fleuve de l'amont à l'aval qui se traduit par la dépendance de x de la fonction H(r,x) définissant, en chaque point d'abscisse x, la hauteur d'eau correspondant au débit r en régime permanent. La pente superficielle pour le débit r en régime permanent est $\left(i-\frac{\partial H}{\partial x}\right)$; pendant la crue, la pente superficielle devient, pour le débit $r+\rho$: $\left(i-\frac{\partial h}{\partial x}\right)$. On peut admettre que cette variation du débit suit la loi de Chézy et, les puissances supérieures à l'unité des rapports à i de $\frac{\partial H}{\partial x}$ et $\frac{\partial h}{\partial x}$ étant négligeables, on a : $\rho = -\frac{r}{2i}\left(\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{\partial H}{\partial x}\right)$, ou, comme $\frac{\partial h}{\partial x}=\frac{\partial H}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial x}+\frac{\partial H}{\partial x}$: $\rho=-\frac{r}{2i}\frac{\partial H}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial x}$.

Pour calculer Δr, on différenciera cette expression approchée de ρ, les dérivées des termes négligés étant elles-mêmes négligeables, comme il est facile de le vérifier.

L'atténuation apparaît comme une correction à apporter à la déformation primaire de la courbe r (t), dans laquelle on peut faire correspondre, à chaque point de cette courbe pour l'abscisse x, un point de la courbe pour l'abscisse $x+\Delta x$ ayant même ordonnée et une abcisse supérieure de $\frac{\Delta x}{v}$, v étant la vitesse de propagation; on a donc, en première approximation, avant cette correction : $\frac{\partial r}{\partial x}=-\frac{1}{v}\frac{\partial r}{\partial t}$ et, comme $\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial H}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial t}$, $\rho=\frac{r}{2iv}\frac{\partial h}{\partial t}$, d'où $\Delta r=\frac{\Delta x}{2i}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{r}{v}\frac{\partial h}{\partial t}\right)$.

On peut transformer cette expression comme il suit :

$$\Delta r = -\frac{\Delta x}{2i}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{r}{v^2}\frac{\partial h}{\partial t}\right)+\frac{\Delta x}{2i}r\frac{\partial r}{\partial t}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{v}\frac{\partial H}{\partial r}\right).$$

Le second terme, nul pour les maxima et minima de la crue, est toujours négligeable dans le cas d'un cours d'eau dont le lit est peu variable; il correspond en effet à une variation relative du débit $\varepsilon = \frac{1}{2i}\frac{\partial r}{\partial t}\Delta\left(\frac{1}{v}\frac{\partial H}{\partial r}\right)$ qui est très petite, $\frac{1}{v}$ et $\frac{\partial H}{\partial r}$ variant en sens inverse (ainsi, pour le Rhin entre Neufbrisach et Strasbourg, la variation de $\frac{1}{v}\frac{\partial H}{\partial r}$ ne dépasse pas 0,0003 sec.² par mètre cube et, pour la montée la plus rapide qui peut atteindre 0,03 mètre cube par sec.², ε est inférieur à 0,7 p. 100).

En conséquence, on peut admettre la valeur ci-après de l'atténuation du débit :

$$\Delta r = -\frac{\Delta x}{2i}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{r}{v^2}\frac{\partial h}{\partial t}\right)$$

ou, en appelant Θ la durée de propagation et η la dénivellation entre les deux stations considérées :

$$\Delta r = -\frac{1}{2\eta}\frac{\partial}{\partial t}\left(\Theta^2 r\frac{\partial h}{\partial t}\right).$$

Cette formule permet de déterminer la déformation secondaire de la courbe $r(t)$: il suffit de tracer la courbe représentant, en fonction du temps, le produit de la vitesse de montée $\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)$ par le débit (r) et par le carré de la durée de propagation correspondant à ce débit(θ^2) et de mesurer l'inclinaison des tangentes à cette courbe (1).

La figure 1 représente l'allure de cette déformation secondaire : la courbe primitive et la courbe déformée se coupent aux points pour lesquels $\Theta^2 r \frac{\partial h}{\partial t}$ est maximum ou minimum et qui sont, en conséquence, situés au-dessus et, en général, très près de ceux qui correspondent aux points d'in-

(1) On ne rencontre pas ici la difficulté à laquelle on se heurterait, comme M. Bachet l'a signalé (page 430), si on voulait déterminer les courbures de l'onde de crue $h(x)$, car la courbe $h(t)$ peut être tracée avec une grande précision en faisant état d'observations suffisamment fréquentes et, si possible, en utilisant une échelle enregistreuse.

flexion de la courbe de crue $h(t)$; les surfaces qu'elles délimitent se compensent entre un minimum et un maximum consécutifs, $\frac{\partial h}{\partial t}$ y étant nul (1).

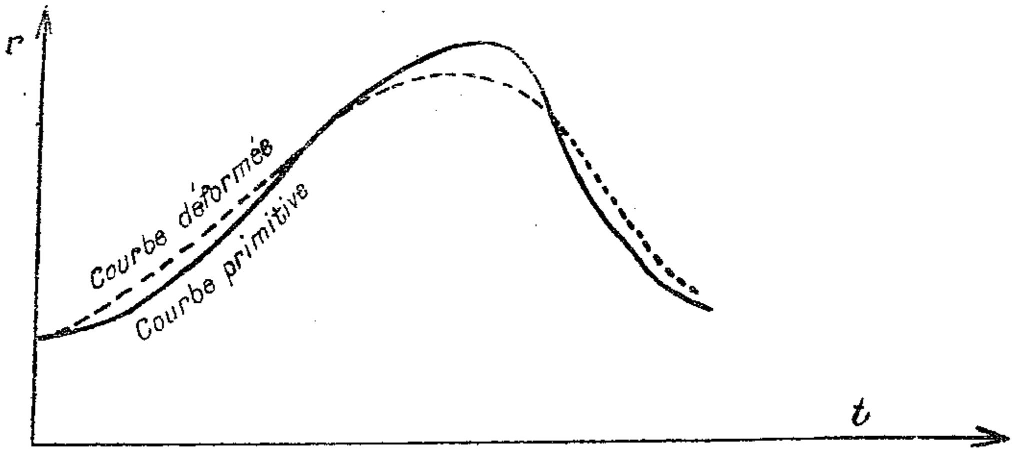

Fig. 1.

Au voisinage des maxima et des minima de la crue, $\frac{\partial h}{\partial t}$ est petit et l'atténuation est approximativement :

$$\Delta r = -\frac{\Theta^2}{2\eta} r \frac{\partial^2 h}{\partial t^2};$$

$-\frac{\partial^2 h}{\partial t^2}$ représente alors la courbure de la courbe de crue et Δr est positif pour les maxima et négatif pour les minima. Par contre, dans les parties de la courbe de crue présentant une forte inclinaison et une faible courbure, $\frac{\partial^2 h}{\partial t^2}$ est négligeable et l'atténuation est approximativement :

$$\Delta r = -\frac{\Theta^2}{2\eta \frac{\partial H}{\partial r}} \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)^2 \left[1 + \frac{2r}{\Theta}\frac{\partial \Theta}{\partial r}\right],$$

dont la valeur est toujours négative, c'est-à-dire qu'il se produit alors une « accentuation » de la crue. L'accentuation

(1) Ces résultats avaient été obtenus par M. l'Inspecteur général Pigeaud dans une étude publiée aux *Annales des Ponts et Chaussées* (1919-IV); il indiquait en outre que l'atténuation est proportionnelle à $\frac{\partial^2 r}{\partial t^2}$ résultat exact au voisinage des maxima et minima, comme on le montre plus loin.

pour la montée uniforme ne peut être négligée devant l'atténuation pour les maxima et les minima : considérons en effet une montée uniforme m par heure et un maximum se produisant n heures après la cessation de cette montée uniforme et admettons que $r = Ch^{3/2}$, le rapport des valeurs de l'accentuation à l'atténuation est approximativement égal à $\frac{3}{2} n \frac{m}{h}$ qui n'est pas négligeable (sur le Rhin au voisinage de Strasbourg $\frac{m}{h}$ peut s'élever à $\frac{1}{30}$ et n à 10 de telle sorte que le rapport en question peut atteindre $\frac{1}{2}$); il en est *à fortiori* de même si l'on considère un minimum.

On a vu que, pour les maxima et les minima de la crue, l'atténuation est $\Delta r = \frac{\Theta^2}{2\eta} r\gamma$, γ étant la courbure de la courbe de crue. De cette formule qui est établie indépendamment de toute hypothèse sur la forme de l'onde de crue et sur la relation entre le débit et le niveau, on déduit facilement, en adoptant, pour la courbure de la courbe de crue, sa valeur approchée $\gamma = 8 \frac{\Delta h}{\Delta t^2}$ où Δh est la flèche correspondant à la corde Δt et en admettant $r = Ch^{3/2} : \Delta t = \sqrt{\frac{8}{3}\frac{h}{\eta}}\Theta$ qui n'est autre que la formule établie par M. BACHET (page 432) et dont il a conclu que la longueur de la corde horizontale tangente à la courbe de crue atténuée et comprise à l'intérieur de la courbe primitive est à peu près indépendante de la forme de cette dernière.

Application à la prévision des crues du Rhin à Strasbourg. — Les crues du Rhin à Strasbourg peuvent être prévues d'après les observations à Neufbrisach. La durée de propagation entre ces deux stations est de 26 à 35 heures, ce qui permet d'annoncer le niveau à Strasbourg un jour à l'avance.

Entre Neufbrisach et Strasbourg, le bassin versant s'accroît de 11 p. 100 sur la rive gauche et de 4 p .100 sur la rive droite et les apports des affluents dont le régime est, sur chaque rive, très uniforme peuvent être appréciés assez exactement par les observations d'une station sur le principal affluent de chaque rive, Riegel sur l'Elz et Kogenheim sur l'Ill (1), les apports des deux rives étant admis égaux aux débits observés à ces stations multipliés par le rapport des bassins versants soit $\frac{1.500}{1.140} = 1,3$ pour Riegel et $\frac{4.000}{3.300} = 1,2$ pour Kogenheim, sauf déduction, des apports de la rive gauche, des 40 mètres cubes par seconde laissés dans l'Ill en aval d'Erstein.

La correspondance entre le niveau et le débit pour le Rhin à Neufbrisach et à Strasbourg, pour l'Elz à Riegel et pour l'Ill à Kogenheim peut être déterminée d'après les jaugeages exécutés au cours des dernières années et moyennant une extrapolation, dont les jaugeages qui seront exécutés au cours des prochaines crues permettront de vérifier l'exactitude.

Les durées de propagation entre les diverses stations peuvent être appréciées par l'observation des crues récentes. On connaît ainsi la durée de propagation entre Neufbrisach et Strasbourg, en fonction du débit à Neufbrisach. Les durées de propagation entre Kogenheim et Strasbourg et entre Riegel et Strasbourg sont à peu près constantes et égales toutes deux à 18 heures.

On peut admettre, en général, que l'atténuation ne joue que sur le débit à Neufbrisach, les apports des affluents étant faibles et les variations de leurs niveaux étant presque toujours assez lentes. Ce n'est que dans le cas où les courbes de crue à Kogenheim ou à Riegel présenteraient des parties à forte courbure, qu'il y aurait lieu de leur substituer une courbe moyenne plus régulière, respectant le débit total de la crue.

Pour déterminer l'atténuation du débit entre Neufbrisach et Strasbourg, il suffit de tracer la courbe de crue $h(t)$ observée à Neufbrisach, de mesurer l'inclinaison des tangentes à cette courbe donnant la vitesse de montée m, puis, connaissant les valeurs de Θ et de r correspondant à chaque valeur

(1) L'Ill se jette dans le Rhin en aval de Strasbourg mais, par un canal de décharge établi à Erstein, le débit de la rivière à cet endroit est, en cas de crue, évacué, à l'exception de 40 m³ par seconde, dans le Rhin en amont de Strasbourg.

de h, de tracer la courbe représentant la variation du produit $\frac{\Theta^2}{2\eta}\ rm$, enfin de mesurer l'inclinaison des tangentes à cette dernière courbe, donnant l'atténuation $A = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\Theta^2}{2\eta} rm\right)$ comme il a été démontré plus haut; m étant exprimé en mètres par heure, Θ en heures, η en mètres et r en mètres cubes par seconde, A en mètres cubes par seconde est égal à la variation de $\left(-\frac{\Theta^2}{2\eta}\ rm\right)$ par heure.

Il convient d'observer que, pour déterminer exactement l'atténuation d'une crue entre deux stations aussi distantes l'une de l'autre que Neufbrisach et Strasbourg, il faudrait diviser le secteur qu'elles limitent en un nombre suffisant d'éléments de longueur Δx et faire l'intégration $\sum \frac{\Delta x}{2i} \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{r}{v^2}\frac{\partial h}{\partial t}\right)$; l'atténuation, qui est en première approximation proportionnelle à la courbure de la courbe de crue, ayant pour effet d'amortir les irrégularités de cette courbe, si on applique à la totalité du secteur considéré l'atténuation unitaire calculée à son origine, on obtient évidemment, lorsque la courbe de crue comporte en ce point de fortes courbures locales, des valeurs correspondantes de l'atténuation totale trop élevées qui peuvent faire apparaître des irrégularités dans la courbe de crue atténuée. Ces irrégularités doivent être supprimées par la substitution d'une courbe régulière, respectant le débit total de la crue; cette courbe régulière ne s'écartera d'ailleurs pas sensiblement de la courbe à rectifier, aux points où cette dernière coupe la courbe primitive, ces points étant, comme on l'a dit, très proches de ceux qui correspondent aux inflexions de la courbe de crue.

Les figures 2, 3 et 4 montrent l'application de la méthode à la crue d'octobre 1935. La figure 2 est relative à la détermination de l'atténuation du débit entre Neufbrisach et Strasbourg : on y a représenté les variations de h, puis de m, puis de $\frac{\Theta^2}{2\eta}\ rm$ et enfin de A. Sur la figure 3, on a tracé, d'après les niveaux observés aux trois stations, la courbe N représentant la variation du débit du Rhin à Neufbrisach, la courbe K représentant la variation du débit de l'Ill à Kogenheim multiplié par 1,2 et diminué de 40 mètres cubes-seconde et la courbe R représentant la variation du débit de l'Elz à Riegel multiplié par 1,3; l'atténuation A transforme la courbe N en N′ à laquelle on est conduit à substituer la courbe régulière N″; à cette dernière on a fait subir la transformation primaire consistant dans la transla-

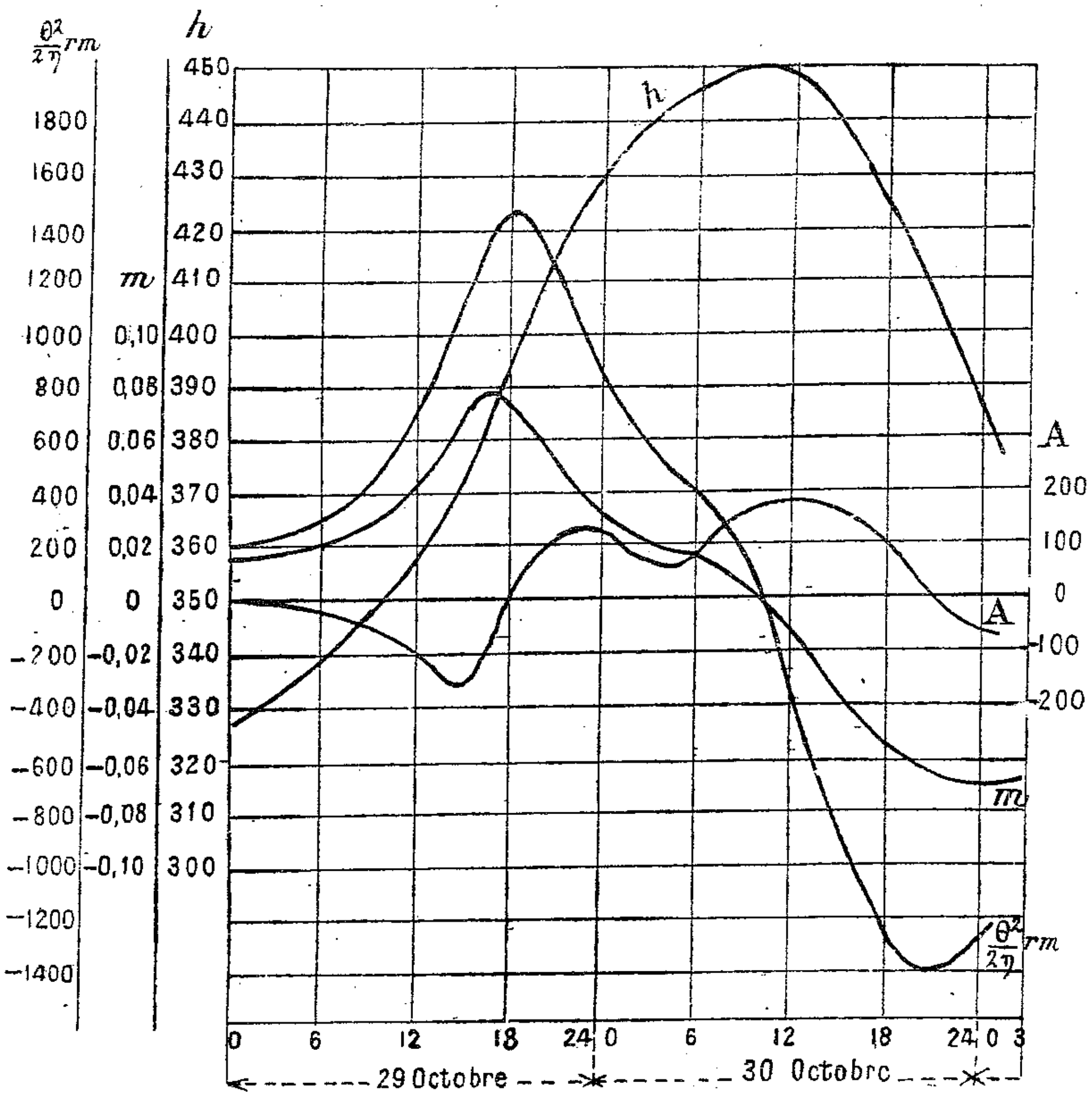

Fig. 2.

tion de chaque élément de la quantité Θ et l'on a obtenu la courbe N‴; la courbe K translatée de 18 heures a donné K′ et la courbe R atténuée en R′ et translatée également de 18 heures a donné R″; l'addition des ordonnées des courbes N‴, K′ et R″ a donné S′, courbe de prévision des débits à Strasbourg. Sur la figure 4, on a tracé la courbe s' de pré-

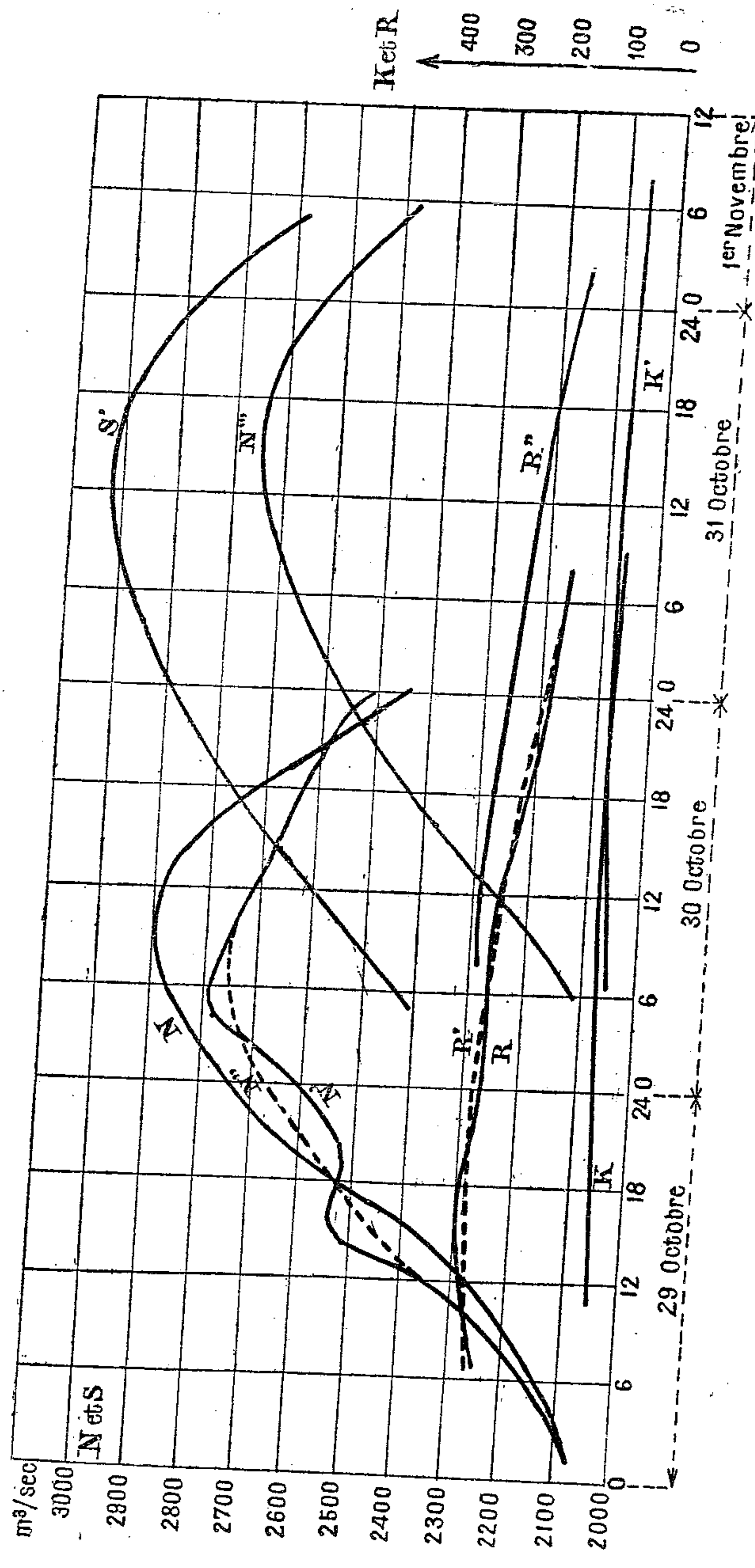
K et R
400
300
200
100
0
m³/sec
3000
2900
2800
2700
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
N et S
S'
N''
R''
K'
R'
R
K
N
0
6
12
18
24
29 Octobre
30 Octobre
31 Octobre
1er Novembre

Fig. 3.

vision des niveaux à l'échelle de Strasbourg d'après la courbe des débits S′ ainsi que la courbe *s* des niveaux réellement observés : on constate que l'écart des deux courbes ne dépasse pas 7 centimètres.

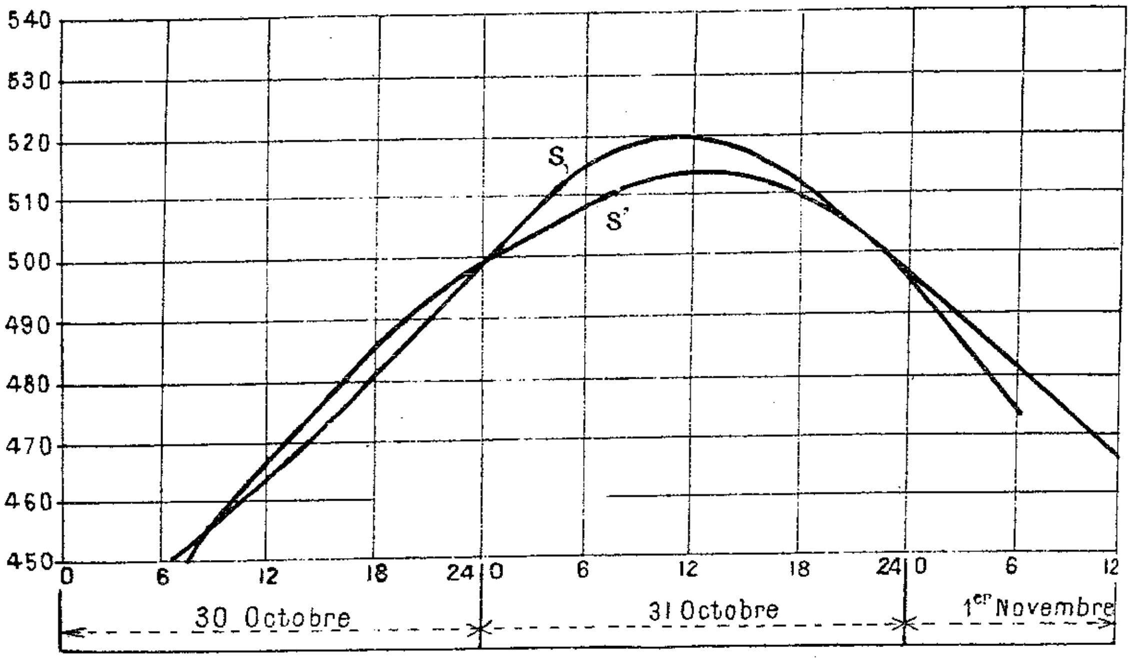

Fig. 4.

On dispose ainsi d'une méthode permettant de prévoir la hauteur des crues du Rhin à Strasbourg 24 heures à l'avance avec une précision d'une dizaine de centimètres. Le service d'annonce des crues du Rhin va être réorganisé de manière à permettre l'établissement de ces prévisions et leur diffusion étendue et rapide.